

# Chapitre 3 : Changement de Référentiel

## I - Généralités:

\* un référentiel est un objet muni d'un système de coord et d'une horloge.

\* Soit 2 refs  $R$  et  $R'$ , l'un est en mvt par l. à l'autre. connaissant le mvt d'un pt matériel  $M$  par rapport à  $R$ , et le mvt de  $R$  par  $X$  à  $R'$ .

### 1 - Notations et def:

\* le ref en mvt est appelé : ref mobile ou relatif

\* le ref fixe est appelé : ref absolue

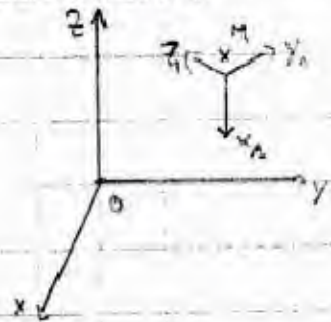
→ Mvt de  $M$  par  $X$  à  $R$ , : mvt relatif

" "  $M$  dans  $R$ ,  $X$  à  $R'$  : mvt d'entraînement

le mvt de  $M$  à  $R$  : mvt absolu

$R(0; x; y; z)$  Ref absolue

$R'(0; x'; y'; z')$  " relatif



### 2 - Notion de point coïncident:

\* la position du pt  $M$  à un instant  $t$  est repérée de 2 manières différentes par  $R$  et  $R'$ .

\* on appelle le pt coïncident (le pt fictif " $P$ ") du ref mobile  $R'$  qui correspond à la position du pt mobile  $M$  à l'instant  $t$ .

\* le pt " $P$ " est rigidement lié à  $R'$  (fixe dans  $R'$ ) en réalité le pt mobile crée une infinité de pt coïncident : un nouveau pt à chaque instant.

### 3 - Notion de vect rotation instantanée:

\* Lorsqu'il s'agit d'un mvt de translation de  $R'$  par rapport à  $R$  le vect vitesse qui définit ce mvt est:

$$\vec{v}(R'/R) = \vec{v}_{R'_0/R} = \frac{d\vec{O O'_0}}{dt}$$

\* Quand le mvt est qq on définit le vect de rotation instantanée noté :  $\vec{\Omega}(R'/R)$



On montre que ce vect est lié au vect unitaire associé à  $R_1$  ( $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ ) par les relations suivantes :

$$\left( \frac{d\vec{e}_1}{dt} \right)_R = \vec{\Omega}(R/R) \wedge \vec{e}_1$$

$$\left( \frac{d\vec{e}_2}{dt} \right)_R = \vec{\Omega}(R/R) \wedge \vec{e}_2$$

$$\left( \frac{d\vec{e}_3}{dt} \right)_R = \vec{\Omega}(R/R) \wedge \vec{e}_3$$

où  $\vec{\Omega}(R/R) = \omega_1 \vec{e}_1 + \omega_2 \vec{e}_2 + \omega_3 \vec{e}_3$

Application: On appellera  $R_c$  le référentiel associé au coord. cylindrique ( $\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z$ ). la base associée à  $R_c$  : ( $\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z$ ).

$R_c$  est en mvt par rapport au Ref  $R$  ( $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ ).

$$\Rightarrow \vec{\Omega}(R_c/R) = ?$$

$$\left( \frac{d\vec{e}_r}{dt} \right)_R = \vec{\Omega}(R_c/R) \wedge \vec{e}_r = \dot{\theta} \vec{e}_\theta \quad (1)$$

$$\left( \frac{d\vec{e}_\theta}{dt} \right)_R = \vec{\Omega}(R_c/R) \wedge \vec{e}_\theta = -\dot{\theta} \vec{e}_r \quad (2)$$

$$\left( \frac{d\vec{e}_z}{dt} \right)_R = \vec{\Omega}(R_c/R) \wedge \vec{e}_z = 0 \quad (3)$$

$$(3) \Rightarrow \vec{\Omega}(R_c/R) = h \vec{e}_z \Rightarrow h = ?$$

$$(1) \Rightarrow h \vec{e}_z \wedge \vec{e}_r = k \vec{e}_\theta = \dot{\theta} \vec{e}_\theta \Rightarrow k = \dot{\theta}$$

vérifions (2)  $\dot{\theta} \vec{e}_z \wedge \vec{e}_\theta = -\dot{\theta} \vec{e}_r$

le vect de rot inst de  $R_c/R$  est  $\vec{\Omega}(R_c/R) = \dot{\theta} \vec{e}_z$ .

même Ex:  $\vec{\Omega}(R_s/R)$  où  $R_s$  : ref associé aux coord sphériques  
 $\rightarrow$  base associée : ( $\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_\phi$ )

les relations qui définissent  $\vec{\Omega}$  sont:

$$(1) - \left( \frac{d\vec{e}_r}{dt} \right)_R = \vec{\Omega}(R_s/R) \wedge \vec{e}_r = \dot{\theta} \vec{e}_\theta + \dot{\phi} \sin \theta \vec{e}_\phi$$

$$(2) - \left( \frac{d\vec{e}_\theta}{dt} \right)_R = \vec{\Omega}(R_s/R) \wedge \vec{e}_\theta = -\dot{\theta} \vec{e}_r + \dot{\phi} \cos \theta \vec{e}_\phi$$

$$(3) - \left( \frac{d\vec{e}_\phi}{dt} \right)_R = \vec{\Omega}(R_s/R) \wedge \vec{e}_\phi = -\dot{\phi} (\sin \theta \vec{e}_r + \cos \theta \vec{e}_\theta)$$



$$\text{où } \vec{\Omega} (R/R) = \omega_1 \vec{e}_r + \omega_2 \vec{e}_\theta + \omega_3 \vec{e}_\varphi$$

$$\omega_1 = \dot{\varphi}, \omega_2 = ? ; \omega_3 = ?$$

$$\text{(1) } \Rightarrow (\omega_1 \vec{e}_r + \omega_2 \vec{e}_\theta + \omega_3 \vec{e}_\varphi) \wedge \vec{e}_r = -\omega_2 \vec{e}_\varphi + \omega_3 \vec{e}_\theta = \dot{\theta} \vec{e}_\theta + \dot{\varphi} \sin \theta \vec{e}_\varphi$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \omega_2 = -\dot{\varphi} \sin \theta \\ \omega_3 = \dot{\theta} \end{cases}$$

$$\text{(2) } \Rightarrow (\omega_1 \vec{e}_r + \omega_2 \vec{e}_\theta + \omega_3 \vec{e}_\varphi) \wedge \vec{e}_\theta = \omega_1 \vec{e}_\varphi - \omega_3 \vec{e}_r = -\dot{\theta} \vec{e}_r + \dot{\varphi} \cos \theta \vec{e}_\varphi$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \omega_3 = \dot{\theta} \\ \omega_1 = \dot{\varphi} \cos \theta \end{cases}$$

vérifions la relation (3)

$$(\omega_1 \vec{e}_r + \omega_2 \vec{e}_\theta + \omega_3 \vec{e}_\varphi) \wedge \vec{e}_\varphi = -\omega_1 \vec{e}_\theta + \omega_2 \vec{e}_r$$

$$= -\dot{\varphi} \sin \theta \vec{e}_r - \dot{\varphi} \cos \theta \vec{e}_\theta$$

$$\Rightarrow \omega_1 = \dot{\varphi} \cos \theta, \omega_2 = -\dot{\varphi} \sin \theta$$

$$\Rightarrow \vec{\Omega} (R/R) = \dot{\varphi} \cos \theta \vec{e}_r - \dot{\varphi} \sin \theta \vec{e}_\theta + \dot{\theta} \vec{e}_\varphi$$

pp est particulière:

i. S'il s'agit d'un réf  $R_2$  en mt par % à  $R$ , est aussi d'un réf  $R_1$  en mt par rapport à  $R$ .

on montre que  $\vec{\Omega} (R_2/R) = \vec{\Omega} (R_2/R_1) + \vec{\Omega} (R_1/R)$  les vect de rot st additives.

ii/ considérons un vect  $\vec{v}$  exprimé de la base d'un réf en mt  $R$  par rapport au réf  $R$ .  $\vec{v} = v_1 \vec{e}_1 + v_2 \vec{e}_2 + v_3 \vec{e}_3$

$$\left( \frac{d\vec{v}}{dt} \right)_R = \frac{dv_1}{dt} \vec{e}_1 + v_1 \frac{d\vec{e}_1}{dt} + \frac{dv_2}{dt} \vec{e}_2 + v_2 \frac{d\vec{e}_2}{dt} + \frac{dv_3}{dt} \vec{e}_3 + v_3 \frac{d\vec{e}_3}{dt}$$

$$\text{or } \left( \frac{d\vec{v}}{dt} \right)_R = \frac{dv_1}{dt} \vec{e}_1 + \frac{dv_2}{dt} \vec{e}_2 + \frac{dv_3}{dt} \vec{e}_3$$

$$\Rightarrow \left( \frac{d\vec{v}}{dt} \right)_R = \left( \frac{d\vec{v}}{dt} \right)_R + v_1 (\vec{\Omega} (R/R) \wedge \vec{e}_1) + v_2 (\vec{\Omega} (R/R) \wedge \vec{e}_2) + v_3 (\vec{\Omega} (R/R) \wedge \vec{e}_3)$$

$$= \left( \frac{d\vec{v}}{dt} \right)_R + \vec{\Omega} (R/R) \wedge (v_1 \vec{e}_1 + v_2 \vec{e}_2 + v_3 \vec{e}_3)$$

$$\left( \frac{d\vec{v}}{dt} \right)_R = \left( \frac{d\vec{v}}{dt} \right)_R + \vec{\Omega} (R/R) \wedge \vec{v} \quad \text{avec } \vec{v} \in \mathbb{R}^3$$



cas particulier : si  $\vec{\omega}$  est fixe ds  $R_1 \Rightarrow \left( \frac{d\vec{\omega}}{dt} \right)_{R_1} = \vec{0}$ .

$$\Rightarrow \left( \frac{d\vec{\omega}}{dt} \right)_R = \vec{\omega}(R/R_1) \wedge \vec{\omega}.$$

## II - loi de composition des vitesses

Soient :  $R(O; \vec{e}_1; \vec{e}_2; \vec{e}_3)$  ref absolue.

$R_1(O; \vec{e}_1; \vec{e}_2; \vec{e}_3)$  ref relatif et  $M$  en mvt dans  $R_1$ .

### 1 - Vitesse relative.

\* Si la vitesse du pt  $M$  par r. au ref relatif  $\vec{v}_r = \vec{v}_{R_1}(M)$

$$\vec{v}_{R_1} = \vec{v}_r(M) = \left( \frac{d\vec{O_1M}}{dt} \right)_{R_1}$$

Si par exemple  $\vec{O_1M} = x_1 \vec{e}_1 + y_1 \vec{e}_2 + z_1 \vec{e}_3$ ,

$$\Rightarrow \left( \frac{d\vec{O_1M}}{dt} \right) = \dot{x}_1 \vec{e}_1 + x_1 \left( \frac{d\vec{e}_1}{dt} \right)_R + \dot{y}_1 \vec{e}_2 + y_1 \left( \frac{d\vec{e}_2}{dt} \right)_R + \dot{z}_1 \vec{e}_3 + z_1 \left( \frac{d\vec{e}_3}{dt} \right)_R$$

( $\vec{e}_1; \vec{e}_2; \vec{e}_3$ ) sont fixes dans  $R$ .

$$\Rightarrow \left( \frac{d\vec{e}_i}{dt} \right)_{R_1} = \left( \frac{d\vec{e}_i}{dt} \right)_R = \vec{0}.$$

$$\vec{v}_r = \dot{x}_1 \vec{e}_1 + \dot{y}_1 \vec{e}_2 + \dot{z}_1 \vec{e}_3.$$

### 2 - Vitesse d'entraînement :

\* C'est la vitesse du pt  $M$  par rapport à  $R$  en le considérant fixe dans  $R_1$ , c'est alors la vitesse du pt coïncidant, par rapport à  $R$ .

- Notation :  $\vec{v}_e$ .

- Elle est définie par  $\vec{v}_e = \left( \frac{d\vec{O_1P}}{dt} \right)_R$  à chaque t. ( $\vec{O_1P} = \vec{O_1M}$ )

$$\left( \frac{d\vec{O_1P}}{dt} \right)_R = \left( \frac{d(\vec{O_1O} + \vec{O_1P})}{dt} \right)_R$$

$$= \left( \frac{d\vec{O_1O}}{dt} \right)_R + \left( \frac{d\vec{O_1P}}{dt} \right)_R$$

$V_R(O_1)$

or  $\vec{O_1P}$  est un vect.  $\in R_1$ .

$$\Rightarrow \left( \frac{d\vec{O_1P}}{dt} \right)_R = \left( \frac{d\vec{O_1P}}{dt} \right)_{R_1} + \vec{\omega}(R/R_1) \wedge \vec{O_1P} \quad (P \text{ est fixe ds } R_1)$$

$$\vec{v}_e = \vec{v}_{R_1}(O_1) + \vec{\omega}(R/R_1) \wedge \vec{O_1P}$$

or à l'instant t on a  $\vec{O_1P} = \vec{O_1M}$ .

$\Rightarrow$  le vect. vitesse d'entraînement est donné par  $\vec{v}_e = \vec{v}_{R_1}(O_1) + \vec{\omega}(R/R_1) \wedge \vec{O_1M}$



### 3. la v. absolue

c'est la vitesse du pt M par rapport au réf absolue R

$$\vec{v}_a = \vec{v}_R(M) = \frac{d\vec{OM}}{dt} \Big|_R = \underbrace{\frac{d\vec{OO'}}{dt}}_R + \frac{d\vec{OM'}}{dt} \Big|_R$$

$$\vec{v}_a = \vec{v}_a(O_1) + \vec{v}_R(M) + \Omega_{R/R} \wedge \vec{O_1M}$$

$$= \vec{v}_r(M) + \vec{v}_a(O_1) + \Omega_{R/R} \wedge \vec{OM}$$

$$\vec{v}_a = \vec{v}_r + \vec{v}_e \quad \text{c'est la loi de la comp des vitesses.}$$

la vitesse du pt M par rapport au réf absolue est la somme de la vitesse de M % à R (réf relatif) est la vitesse de M % au réf absolue R en le considérant au pt fixe de R.

### III - loi de composition des accélérations

Avec les m<sup>êmes</sup> considérations on va déterminer:  $\vec{a}_r, \vec{a}_e, \vec{a}_a$ .

1. Vect accélération relative:

$$\vec{a}_r = \vec{a}_R(M) = \frac{d^2 \vec{OM}}{dt^2} = \ddot{x} \vec{e}_x + \ddot{y} \vec{e}_y + \ddot{z} \vec{e}_z$$

2. Accélération d'entraînement:

$$\vec{a}_e = \frac{d^2 \vec{OP}}{dt^2} \quad \text{Acc du pt coïncident \% à R.}$$

$$= \frac{d^2 \vec{OO'}}{dt^2} + \frac{d}{dt} \left( \frac{d\vec{OP}}{dt} \right)$$

$$= \vec{a}_R(O_1) + \frac{d}{dt} \left( \vec{\Omega}_{R/R} \wedge \vec{O_1P} \right)$$

$$= \vec{a}_R(O_1) + \left( \frac{d\vec{\Omega}_{R/R}}{dt} \right) \wedge \vec{O_1P} + \vec{\Omega}_{R/R} \wedge \frac{d\vec{O_1P}}{dt}$$

à l'instant t.

à la position de M

$$\Rightarrow \vec{O_1P} = \vec{OM}$$

le vect accélération d'entraînement est alors

$$\vec{a}_e = \vec{a}_R(O_1) + \frac{d\vec{\Omega}_{R/R}}{dt} \wedge \vec{OM} + \vec{\Omega}_{R/R} \wedge (\vec{\Omega}_{R/R} \wedge \vec{OM})$$

Rq: on peut vérifier facilement que  $\vec{a}_e \neq \frac{d\vec{v}_e}{dt}$

3. Accélération absolue:

c'est l'axe du pt M % R.

$$\vec{a}_a = \frac{d^2 \vec{OM}}{dt^2} = \frac{d^2 \vec{OO'}}{dt^2} \Big|_R + \frac{d^2 \vec{OM'}}{dt^2} \Big|_R$$

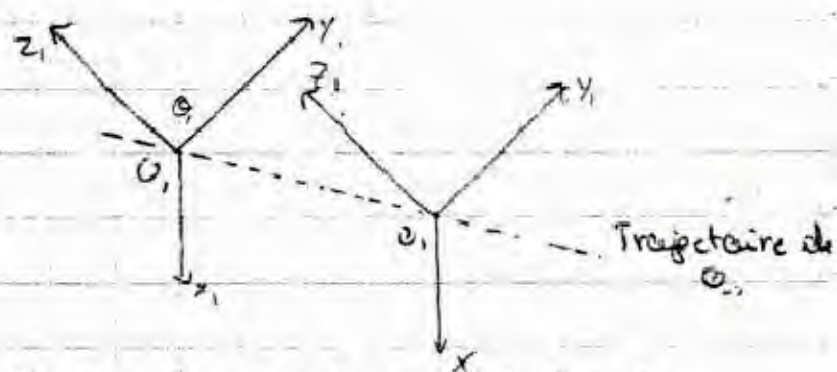
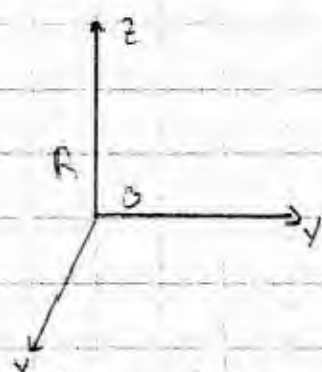


$$\begin{aligned}
&= \vec{v}_R(O_1) + \frac{d}{dt} \left( \frac{d\vec{O}_1 R}{dt} \right)_R, \quad \vec{O}_1 R \in R, \\
&= \vec{v}_R(O_1) + \frac{d\vec{v}_R}{dt}_R + \vec{\Omega} \wedge \vec{v}_R + \frac{d\vec{\Omega}}{dt}_R \wedge \vec{O}_1 R + \vec{\Omega} \wedge \frac{d\vec{O}_1 R}{dt}_R \\
&= \vec{v}_R(O_1) + \vec{v}_R(R) + \vec{\Omega} \wedge \vec{v}_R + \frac{d\vec{\Omega}}{dt}_R \wedge \vec{O}_1 R + \vec{\Omega} \wedge \left[ \left( \frac{d\vec{O}_1 R}{dt} \right)_R + \vec{\Omega} \wedge \vec{O}_1 R \right] \\
\vec{v}_A &= \vec{v}_R(R) + \vec{v}_R(O_1) + \frac{d(\vec{\Omega})}{dt}_R \wedge \vec{O}_1 R + \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{O}_1 R) + 2 \vec{\Omega} \wedge \vec{v}_R
\end{aligned}$$

Rq sur  $\vec{v}_C$ :

- $\vec{v}_C$  est un terme produit entre un terme de vit relatif est un terme de vit d'entraînement.
- $\vec{v}_C = \vec{0}$  si  $\vec{\Omega}$  colinéaire à  $\vec{v}_R$
- $\vec{\Omega} = \vec{0}$   $\vec{v}_R = \vec{0}$  (R est immobile  $\gamma$  à R<sub>0</sub>)

#### IV - Nature du vit d'entraînement



vit de translation =  $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$  gardant les directions

$\Rightarrow$  R ne subit aucune rotation  $\gamma$  R alors  $\vec{\Omega}_{R/R} = \vec{0}$

$$\Rightarrow \begin{cases} \vec{v}_C = \vec{v}_R(O_1) \\ \vec{v}_C = \vec{v}_R(O_1) \\ \vec{v}_C = \vec{0} \end{cases}$$

Le vit de Translation de R est dit rectiligne si l'origine O, garde une direction fixe, il est rectiligne uniforme si  $\vec{v}_R(O_1) = cte \Rightarrow \vec{v}_C(O_1) = \vec{0} \Rightarrow \vec{v}_C = \vec{0}$

2 - Cas d'un vit de rotation autour d'un axe:

La rotation de R  $\gamma$  R autour d'un axe (D) si  $\forall$  les pts de (D) sont fixes dans R

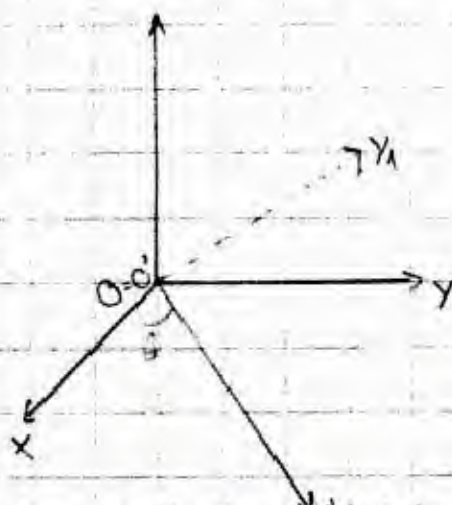
Pour simplifier on considèrera:

- R(O, x, y, z) réf absolue

- R1(O1, x1, y1, z1) réf relative avec O = O1, z = z1



$\Rightarrow R_1$  est en rot  $\gamma R$  autour de l'axe  $(Oz)$



$$\theta = (\vec{Ox}; \vec{Ox'})$$

Si on pose  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  : vitesse angulaire

$\Rightarrow$  le mt de rotation de  $R_1 \gamma R$  est représenté par le vect de rotation instantané

$$\Rightarrow \vec{\Omega}_{R_1/R} = \dot{\theta} \vec{e}_3 = \omega \vec{e}_3$$

$$\|\vec{\Omega}_{R_1/R}\| = \omega$$

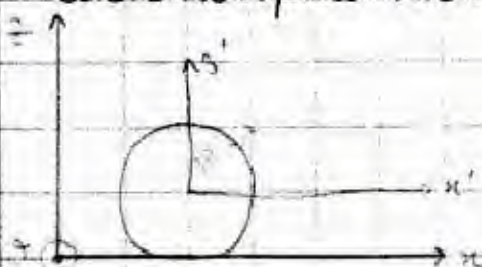
Cas particulier: rotation uniforme

c'est lorsque :  $\omega = \text{cte}$  du fait que :  $\alpha = 0 \Rightarrow \begin{cases} \vec{\Omega} = \vec{\Omega}_{R_1/R} = \vec{\Omega} \wedge \vec{OR} \\ \vec{v}_R = \frac{d\vec{R}}{dt} = \vec{\Omega} \wedge \vec{R} \end{cases}$

Cas généraux: On peut démontrer qu'un mt qq de  $R_1 \gamma R$  peut être décomposé à  $t$  instant en un mt de rot autour d'un axe :  $\rightarrow$  mt de rot  
:  $\rightarrow$  mt de trans

Exemples. (voir la suite de ex 7 série 3)

- un disque de rayon  $R$  tourne autour de son axe et son centre se déplace sur une droite horizontale:



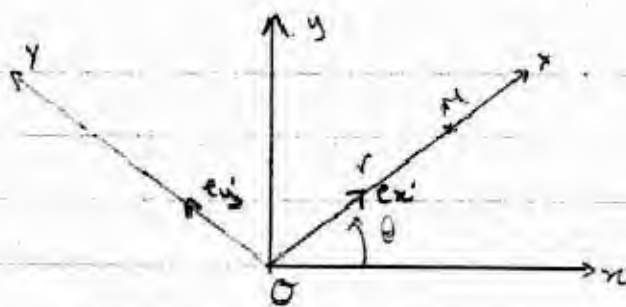
A est un pt du disque  $(\vec{e}_3; \vec{e}_x) = \vec{\theta}$

- le mt de disque autour de son axe engendre le mt de rot
- le mt rectiligne du centre engendre le mt de translation.

Ex 8 d'app.

- Dans le plan  $(O, x, y)$  on considère un système d'axe mobile  $(O, x', y')$  avec  $(Ox')$  fait un angle  $\theta$   $(Ox)$
- un pt mobile sur l'axe est repéré par  $\|\vec{OR}\| = r$
- Trouver la vitesse relative de  $\gamma$  et déduire  $\vec{v}_R$  et  $\vec{v}_A$





$R'(O; x'; y')$  est réf relatif.  
 $R(O; x; y)$  est réf absolue.

$$\vec{v}_r = \left( \frac{d\vec{or}}{dt} \right)_{R'} = \left( \frac{dr \vec{e}_x'}{dt} \right)_R$$

$$= \dot{r} \vec{e}_x' + r \frac{d\vec{e}_x'}{dt} \Big|_R$$

$$\vec{v}_r = \dot{r} \vec{e}_x'$$

$$= \vec{v}_O(\dot{O}) + \vec{\Omega}_{R'/R} \wedge \vec{Ox}$$

Il n'y a pas de mouvement de rotation  $\Rightarrow \vec{\Omega}_{R'/R} = \dot{\theta} \vec{e}_3$

$$\vec{v}_e = \dot{\theta} \vec{e}_3 \wedge r \vec{e}_x' = r \dot{\theta} \vec{e}_y'$$

$$\vec{v}_O = \vec{v}_r + \vec{v}_e$$

$$= \dot{r} \vec{e}_x' + r \dot{\theta} \vec{e}_y'$$

$$\vec{v}_O(x) = \vec{v}_R(x) \text{ fixe} \quad \text{et} \quad \vec{v}_{R'}(x) = \vec{v}_r(x) \text{ mobile}$$

on peut identifier  $(\vec{e}_x', \vec{e}_y')$  à la base polaire  $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta)$

$\vec{e}_\theta = ?$  En utilisant la C.C.A

$$\vec{v}_O = \vec{v}_r + \vec{v}_e + \vec{v}_c$$

$$\vec{v}_r = \vec{v}_{R'}(x) = \left( \frac{d\vec{v}_r}{dt} \right)_{R'}$$

$$\vec{v}_r = \dot{r} \vec{e}_x'$$

$$\vec{v}_e = \vec{v}_R(O) + \left( \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \right)_R \wedge \vec{Ox} + \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{Ox})$$

$O = O \Rightarrow O$  est fixe.

$$\vec{v}_e(O) = \vec{v}_R(O) = \vec{v}_R(O) = \vec{0}$$

$$\left( \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \right)_R = \left( \frac{d\dot{\theta} \vec{e}_3}{dt} \right)_R = \ddot{\theta} \vec{e}_3 + \dot{\theta} \left( \frac{d\vec{e}_3}{dt} \right)_R$$

$$\vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{Ox}) = \dot{\theta} \vec{e}_3 \wedge (r \dot{\theta} \vec{e}_y')$$

$$= r (\dot{\theta})^2 \vec{e}_x'$$

$$\left( \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \right)_R \wedge \vec{Ox} = \ddot{\theta} \vec{e}_3 \wedge r \vec{e}_x' = r \ddot{\theta} \vec{e}_y'$$



$$\vec{f}_c = r \ddot{\theta} \vec{e}_y - r(\dot{\theta})^2 \vec{e}_x$$

$$\vec{f}_c = 2 \vec{\Omega} \wedge \vec{v}_r$$

$$= 2 \dot{\theta} \vec{e}_3 \wedge r \dot{\theta} \vec{e}_x$$

$$= 2 \dot{\theta} \dot{\theta} r \vec{e}_y$$

Finalemment  $\vec{f}_a = \ddot{r} \vec{e}_x + r \ddot{\theta} \vec{e}_y - r(\dot{\theta})^2 \vec{e}_x + 2 \dot{r} \dot{\theta} \vec{e}_y$

$$\vec{f}_a = \begin{pmatrix} \ddot{r} - r\dot{\theta}^2 \\ r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} \end{pmatrix}$$

$(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_3)$





ETUSUP.com

Programmmation  
**Cours**  
Electricité  
Physique  
Résumés  
Analyse  
Livres  
**Exercices**  
Contrôles Continus  
Langues  
Thermodynamique  
Multimedia  
**Divers**  
Economie  
Travaux Dirigés  
Chimie Organique  
Informatique  
Optique  
Chimie  
Diapo  
Algèbre  
Corrigés  
Mathématiques  
Mécanique  
Travaux Pratiques  
Droit

et encore plus..